

SISTEMA DE CONTROL DE RIEGO CON FUNCIONES DE MONITOREO PARA CULTIVOS HIDROPÓNICOS BASADO EN EL MÉTODO DE BANDEJA DE DEMANDA

IRRIGATION CONTROL SYSTEM WITH MONITORING FUNCTIONS FOR HYDROPONIC CROPS BASED ON THE DEMAND TRAY METHOD

Juan Carlos Gómez Cortés

Tecnológico Nacional de México en Celaya
m1703042@itcelaya.edu.mx

Daniel Rodríguez Mercado

Tecnológico Nacional de México en Roque
darodriguez@itroque.edu.mx

José Javier Díaz Carmona

Tecnológico Nacional de México en Celaya
jdiazcarmona@itcelaya.edu.mx

Resumen

En el presente artículo se describe la implementación de un sistema de control de riego en un cultivo hidropónico basado en el método de bandeja de demanda, utilizando el software LabVIEW (de la empresa National Instruments) en conjunto con una base de datos en Access (de la empresa Microsoft) para lectura/escritura de variables propias del cultivo. Se presentan los resultados experimentales de cada uno de los procesos involucrados en el control y monitoreo. Se discute el impacto económico y ambiental de un riego con intervalos controlados mediante el uso de un control PID. De acuerdo a los resultados obtenidos el sistema de riego implementado es una herramienta que permite tener un control de riego iterativo con un número reducido de variables de proceso el cual puede ser usado en cultivos.

Palabra(s) Clave: bandeja demanda, base datos, hidropónico, LabVIEW, riego.

Abstract

This paper describes the implementation of an irrigation control system in a hydroponic crop using the drainage hydrograph method, employing LabVIEW software (from National Instruments) in association with an Access database (from Microsoft) for reading/writing of crop variables. The experimental results of each of the processes involved in control and monitoring are reported. The economic and environmental impact of irrigation with controlled intervals using PID controller is discussed. According to the results obtained, the implemented irrigation system is a tool that allows to have an iterative irrigation control system with a reduced number of process variables which can be used in crops.

Keywords: database, drainage hydrograph, hydroponic, irrigation, LabVIEW.

1. Introducción

Los sistemas modernos de cultivo suelen incorporar los nutrientes disueltos en el agua, técnica que se conoce con el nombre de ferti-irrigación. La tendencia en técnicas de cultivo es la hidroponía, la característica principal de la hidroponía es el uso de un sustrato como base para un cultivo, el sustrato es todo aquel material sólido distinto al suelo in situ, que, colocado en un contenedor, de manera pura o en mezcla, permite el anclaje radicular de la planta. [Gómez et al., 2018] Recientemente, diversos grupos de investigación han realizado un buen número de trabajos dedicados al control automático de la programación y operación del riego para aplicar la cantidad exacta de agua y nutrientes requerida por los cultivos con la máxima precisión. El objetivo es incrementar los rendimientos, reducir los costos, optimizar el uso del agua y nutrientes, y minimizar el impacto ambiental. [Rodríguez, 2013].

La calidad de riego en un cultivo puede medirse mediante el estrés hídrico, permitiendo conocer la demanda de agua del cultivo con respecto al volumen de riego disponible, es importante entonces mantener un flujo constante y regulado de agua en el cultivo. Un método simple y eficaz, para controlar automáticamente la programación de riego en cultivos de sustrato es usar una bandeja de control de riego comúnmente llamadas bandejas de riego a la demanda [Urrestarazu, 2004;

Cáceres et al., 2007]. Este tipo de bandeja contiene dos electrodos colocados a diferentes alturas. Un electrodo está sumergido constantemente. Cuando el nivel de agua disminuye por un nivel especificado debido al consumo de agua de las plantas en la unidad de control, el segundo electrodo está expuesto y una señal eléctrica provoca el riego. Esta bandeja funciona como un sistema de control simple de encendido/apagado. El nivel del segundo electrodo tiene que ser ajustado manualmente para obtener la fracción de lavado (relación entre el volumen de riego aplicado al cultivo y el volumen de drenaje devuelto por el cultivo) que asegura la eliminación adecuada de sales del sustrato. El principal inconveniente de este tipo de bandeja es que debe calibrarse manualmente. [Rodríguez, 2013].

Debido a la poca retención de líquidos de los sustratos que se utilizan en los cultivos hidropónicos, es vital aplicar con precisión el agua y nutrientes necesarios en los cultivos el cual es el enfoque de este proyecto. El control optimo del volumen de riego permite prevenir estrés hídrico severo (que se traduce como pérdida parcial o total de un cultivo), acumulación de sal en el sustrato y reducción del rendimiento [Sonneveld, 2000; Massa et al., 2010]. Sin embargo, si se aplican volúmenes de riego excesivos, se producirían pérdidas de agua y nutrientes (no aprovechadas por el cultivo), lo que aumentaría los costos de mantenimiento y causaría daños ambientales debido a la contaminación de las aguas subterráneas [Gallardo et al., 2009]. Algunas de las técnicas aplicadas actualmente en los cultivos hidropónicos, por mencionar los más populares, son: el riego superficial [Hibbs et al., 1992; Pérez et al., 1995], riego por aspersión [Evans et al., 2011], riego por goteo [Zazueta y Smajstrla, 1992], riego por goteo subterráneo [Dukes y Scholberg, 2005] y riego en zonas [Davis y Dukes, 2012].

A una alta frecuencia de riego aplicada a un cultivo de sustratos hace que este proceso sea casi continuo [Rodríguez, 2015], por lo que un nuevo algoritmo teórico de control de programación de riego automático basado en el uso de un controlador proporcional-integral-derivativo (PID) fue propuesto. El controlador PID utiliza información sobre valores pasados y actuales de fracciones de lavado medidas y las compara con una fracción de lavado objetivo para regular los intervalos de riego. El uso de un ambiente de programación gráfico basado en bloques funcionales

como lo es el software de LabVIEW permite un manejo de datos con posibilidad de manejo de base de datos [Alba et al., 2014] lo cual representa una herramienta útil al agricultor para la toma de decisiones sobre el riego o el cultivo. El uso de una tarjeta de adquisición en conexión con LabVIEW proporciona libertad para crear un sistema modular de control, lo que se traduce en el uso de más sensores que permitan conocer parámetros físicos del cultivo con técnicas no invasivas [Urrestarazu, 2017]. Podemos mencionar además la posibilidad del monitoreo de variables de manera remota reduciendo al máximo la intervención de un usuario en el proceso de monitoreo y control de riego, de la misma manera que ocurre en aplicaciones de seguridad aplicados en domótica [Moataz et al., 2013].

2. Desarrollo

El objetivo principal del riego es satisfacer el consumo de agua del cultivo y suministrar una cantidad adicional de agua para evitar la acumulación de sal en el sustrato [Sonneveld, 2000; Massa et al., 2010].

Con el fin de mantener un balance adecuado de agua y sal en el sustrato, se define el concepto de fracción de lavado (FL). La fracción de lavado se define como la relación entre el volumen del agua drenada (V_D) y el volumen de agua de riego aplicada (V_R). Existe un estándar ideal de fracción de lavado (FL_C) que depende de la concentración de sal en el agua de riego y de la tolerancia del cultivo a la sal. Existen una variedad de métodos para el cálculo ideal de fracción de lavado, los cuales se describen en [Sonneveld y Voogt, 2009].

El sistema físico consta de una bandeja sobre la que se colocan uno o varios recipientes del sustrato sobre el que se desarrollan las plantas. La solución nutritiva se aplica al sustrato mediante un sistema de riego localizado. La planta absorbe una parte del agua aplicada al sustrato y el exceso de agua se elimina a través de un orificio de drenaje (figura 1). El volumen de agua aplicado (V_R) puede determinarse a partir del caudal del emisor (q), el número de emisores por bandeja (n_e) y la duración del riego (t_r). La lámina (Cantidad de agua existente en el suelo) aplicada puede obtenerse dividiendo este volumen por el marco de plantación (S_p) y el número de plantas por bandeja (n_p) de acuerdo a la ecuación 1 [Rodríguez, 2013].

$$V_R = \frac{n_e * q * t_r}{S_p * n_p} \quad (1)$$

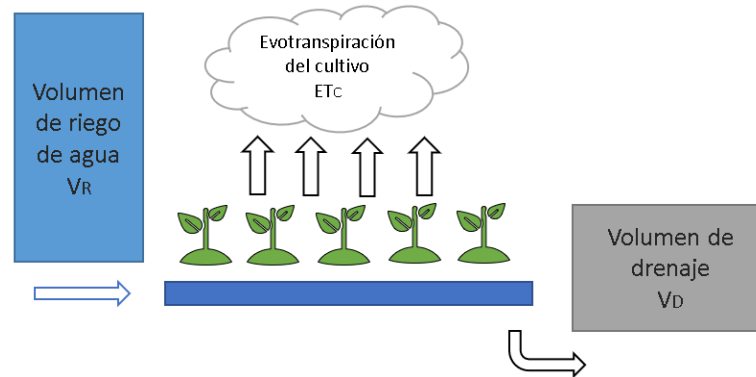


Figura 1 Diagrama básico de la bandeja demanda.

Conociendo el volumen de drenaje y el volumen de riego aplicados a un cultivo, es posible determinar dos parámetros importantes del cultivo (Evo-transpiración y fracción de lavado). La evo-transpiración del cultivo que permite estimar el consumo de agua entre dos operaciones de riego aplicado en un cultivo el cual se determina por la ecuación 2.

$$ET_c = V_R - V_D \quad (2)$$

Un objetivo prioritario es proporcionar un volumen de agua consumida por el cultivo más un volumen adicional de lavado para compensar el volumen de agua extraído por el cultivo y mantener la concentración de sal en el sustrato dentro de niveles óptimos [Hayward y Long, 1943; Jobes y Hoffman, 1981; Hoffman, 1985; Sonneveld, 2000]. La fracción de lavado (FL) en un cultivo se obtiene mediante ecuación 3.

$$FL = \frac{V_D}{V_R} \quad (3)$$

En un cultivo es necesario evitar el estrés hídrico, además se debe mantener un nivel de solución en el sustrato que permita a la planta extraer nutrientes de manera natural. Ese nivel se conoce como nivel de agotamiento permisible (P_r), el cual se puede obtener conociendo la fracción del Intervalo de Humedad Disponible (TAW_s)

del sustrato y éste, a su vez, es una fracción del volumen total del sustrato (V_s). El volumen total de agua que puede extraerse de sustrato sin que exista riego de que la planta sufra estrés hídrico (V_{ac}) puede calcularse utilizando ecuación 4 [Rodríguez, 2013].

$$V_{ac} = TAW_s * V_s * P_r \quad (4)$$

Se estableció una función de volumen de riego (V_R) en función del volumen de agotamiento del sustrato (V_{ac}) y de la fracción de lavado (FL) como se define en la ecuación 5.

$$V_R = \frac{V_{ac}}{1 - FL} \quad (5)$$

Como lo demuestra en su investigación [Rodríguez, 2017] es posible implementar el PID utilizando como variable de proceso la Fracción de Lavado (FL) o el volumen de riego (V_R), en la experimentación, ambas variables entregan resultados satisfactorios, para este artículo se optó por usar la Fracción de lavado (FL) como variable de proceso.

La ecuación 6 describe el modelo de control para los intervalos de riego, utilizando un controlador PID que compara la variable de proceso con el valor deseado, resultando un error y tratando de minimizarlo usando compensaciones.

$$I_{i+1} = I_i + K_P(FL_i - FL_c) + K_I \sum_{k=i-m+1}^i (FL_k - FL_c) + K_D \left(\frac{(FL_i - FL_c) - (FL_{i-1} - FL_c)}{I_i} \right) \quad (6)$$

En donde I es la duración entre intervalos de dos riegos consecutivos (en minutos). FL es la fracción de lavado. Los subíndices i , $i+1$ e $i-1$ hacen referencia a los riegos actuales, siguientes y anteriores respectivamente. El subíndice k denota el cálculo de la variable en la última iteración mientras que el subíndice c indica el valor ideal. El número de los anteriores riegos, m , es un parámetro para el algoritmo de control y debe ser definido por el usuario. Las variables K_P , K_I y K_D son las ganancias proporcionales, integrales y derivativas del controlador PID, respectivamente.

Utilizando una base de datos se tiene registrado los parámetros físicos de los sustratos más comunes usados en la hidroponía (figura 2).

Sustratos							
SustratoPk	NombreSus	DencApa	EPoroso	CAireacion	AFD	AReserva	ATD
1	Tezontle	0.57	0	0	0	0	1
2	Perlita	0.127	87	58.1	69	2.7	71.7
3	Fibra de Coco	0.059	96.1	44.9	19.9	3.5	22.4
4	Corteza de pin	0.19	80.6	28.4	12.7	2.6	15.3
5	Arena (Grava)	1.53	42.2	35.8	0	0	2.5
6	Lana de Roca	0.068	97.4	35.9	58.8	0.3	59.1
*	0	0	0	0	0	0	0

Figura 2 Parámetros registrados en base de datos.

Desde el software de LabVIEW se generó un VI (instrumento virtual) que permite adquirir los datos registrados en la base de datos y poder manipularlos mediante operaciones numéricas, la programación se muestra en la figura 3.

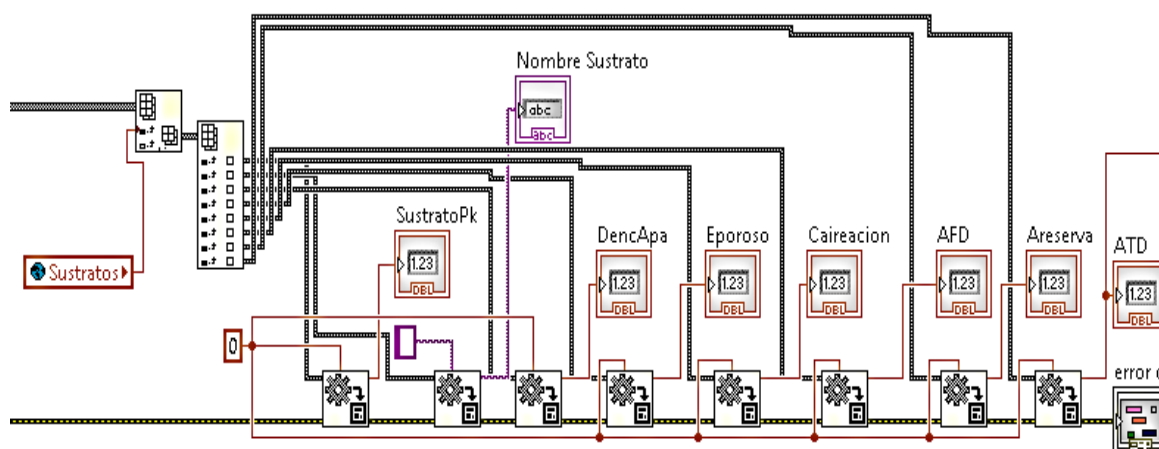


Figura 3 Lectura de base de datos en LabVIEW

También se creó una pantalla (figura 4) para introducir los datos de control que calculan el intervalo de tiempo para riego usando la ecuación 6 y el volumen de riego utilizando la ecuación 5. Estos datos deben ser introducidos por el usuario según las condiciones físicas.

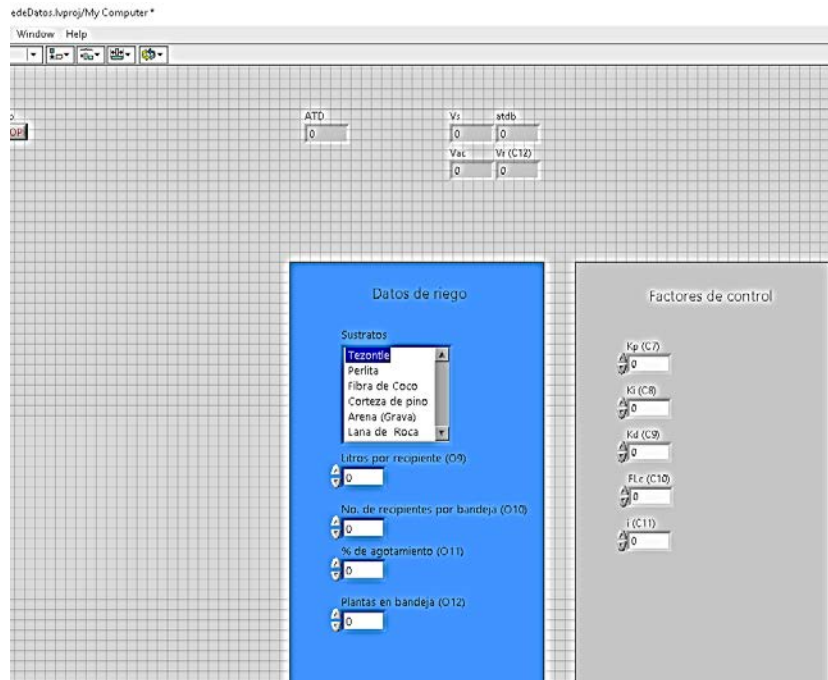


Figura 4 Interfaz de usuario en LabVIEW

3. Resultados

Para la primera prueba se utilizaron los parámetros de entrada descritos en la figura 5.



Figura 5 Parámetros de entrada

Para esta primera prueba se definió i como el intervalo inicial de riego, y un FL inicial de 0.7, es decir, hay un exceso de volumen de drenaje, a continuación, se presentan los datos registrados en Access (tabla 1) y la gráfica de FL en comparación de FL_C donde se aprecia la acción del controlador PID (figura 6).

Tabla 1 Base de datos generada con FL inicial de 0.7.

Tiempo	FL_C	FL (Drenaje)	Error	Proporcional	Integral	Derivativo	Incremento	Intervalo
400	0.3	0.7	0.4	24	40	0.001724138	64.00172414	400
464	0.3	0	-0.3	-18	10	-0.00307016	-8.00307016	464
456.0017241	0.3	0	-0.3	-18	-60	0	-78	456.001724137931
377.998654	0.3	0	-0.3	-18	-60	0	-78	377.998653974101
299.998654	0.3	0.004004576	-0.29599542	-17.7597254	-59.5995424	3.59737E-05	-77.3592318	299.998653974101
222.6393862	0.3	0.267026087	-0.03297391	-1.97843479	-32.8969337	0.002801617	-34.8725668	222.63938621219
187.7640537	0.3	0.385602217	0.085602217	5.136133038	5.262830418	0.001196736	10.40016019	187.764053735222
198.1658188	0.3	0.350236216	0.050236216	3.014172963	13.58384334	-0.00032935	16.59768695	198.165818808414
214.7650318	0.3	0.293798892	-0.00620111	-0.3720665	4.403510778	-0.00051589	4.030928393	214.765031843123
218.7961468	0.3	0.280093101	-0.0199069	-1.19441394	-2.61080073	-0.0001275	-3.80534218	218.796146779611
214.9904162	0.3	0.293032585	-0.00696742	-0.41804491	-2.68743142	0.000122137	-3.10535419	214.990416215277
211.8848124	0.3	0.303591638	0.003591638	0.215498273	-0.33757773	9.97253E-05	-0.12197973	211.884812387687
211.7628551	0.3	0.304006293	0.004006293	0.240377565	0.759793064	3.89781E-06	1.000174527	211.762855072556
212.7631254	0.3	0.300605374	0.000605374	0.036322413	0.46116663	-3.1894E-05	0.497457149	212.763125426533
213.2606184	0.3	0.298913898	-0.0010861	-0.06516615	-0.04807289	-1.5871E-05	-0.11325491	213.260618367638
213.1473474	0.3	0.299299019	-0.00070098	-0.04205888	-0.17870837	3.61741E-06	-0.22076363	213.147347436133
212.9265643	0.3	0.300049681	4.96813E-05	0.00298088	-0.06513	7.05296E-06	-0.06214206	212.926564314455

El cultivo alcanzó la FL_C al ser aplicado una acción de control correctiva, al alcanzar este valor se encontró que el intervalo en tiempo de riego óptimo i es igual a 212 minutos.

Para el siguiente experimento, se mantuvieron los datos de entrada constantes y se redujo el FL inicial a 0 lo que se traduce en que el cultivo no entrega volumen de drenaje ($V_D=0$). Se presenta en la tabla 2 la base de datos y la gráfica de corrección del controlador PID en la figura 7.

El intervalo de riego óptimo i alcanzo un valor de 212 minutos a pesar de que la condición inicial se estableció como $FL= 0$.

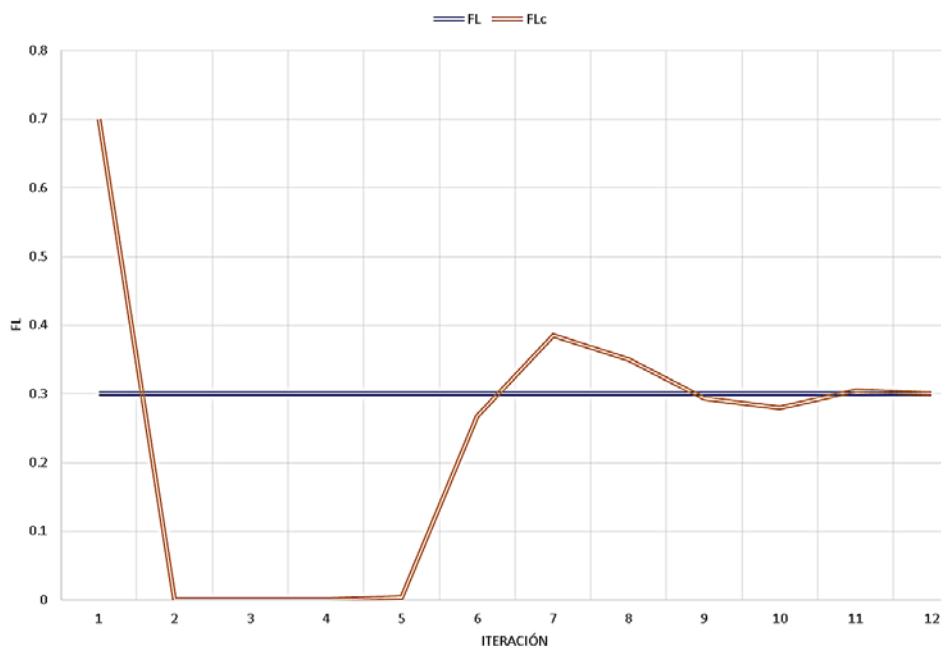


Figura 6 Acción de control aplicado al riego.

Tabla 2 Base de datos generada con un valor inicial de $FL=0$.

Tiempo	FLc	FL (Drenaje)	Error	Proporcional	Integral	Derivativo	Incremento	Intervalo
400	0.3	0	-0.3	-18	-30	-0.00170455	-48.0017045	400
352	0.3	0	-0.3	-18	-60	0	-78	352
273.998295	0.3	0.092405795	-0.2075942	-12.4556523	-50.7594205	0.000876785	-63.2141959	273.998295454
210.783223	0.3	0.307337043	0.007337043	0.440222564	-20.0257162	0.002248251	-19.5832454	210.783222727
191.198606	0.3	0.37392474	0.07392474	4.435484398	8.126178269	0.000653581	12.56231625	191.198605894
203.762517	0.3	0.331207443	0.031207443	1.87244657	10.51321828	-0.00039526	12.38526959	203.762516811
216.148835	0.3	0.28909396	-0.01090604	-0.65436239	2.030140301	-0.00038721	1.375390704	216.148835243
217.524218	0.3	0.284417659	-0.01558234	-0.93494045	-2.64883807	-4.3716E-05	-3.58382223	217.524217896
213.940052	0.3	0.296603823	-0.00339618	-0.20377064	-1.89785182	0.000115052	-2.10150741	213.940052170
211.838386	0.3	0.303749488	0.003749488	0.224969258	0.035331026	6.73805E-05	0.260367664	211.838385988
212.098801	0.3	0.302864075	0.002864075	0.17184453	0.661356313	-8.3164E-06	0.833192527	212.098801324
212.93207	0.3	0.300030964	3.09635E-05	0.001857812	0.289503903	-2.6574E-05	0.291335141	212.932069548
213.223423	0.3	0.299040362	-0.00095964	-0.05757828	-0.09286745	-9.2982E-06	-0.15045503	213.223422947
213.072951	0.3	0.299551968	-0.00044803	-0.02688193	-0.14076702	4.80595E-06	-0.16764415	213.072950643
212.905292	0.3	0.300122006	0.000122006	0.007320352	-0.03260263	5.35549E-06	-0.02527693	212.905292393
212.880015	0.3	0.300207949	0.000207949	0.012476957	0.032995514	8.07263E-07	0.045473278	212.880014918
212.925493	0.3	0.300053325	5.33247E-05	0.00319948	0.026127395	-1.4522E-06	0.029325422	212.925492744
212.95482	0.3	0.299953611	-4.6389E-05	-0.00278337	0.000693522	-9.3649E-07	-0.00209078	212.954820426
212.952729	0.3	0.299960721	-3.9279E-05	-0.00235674	-0.00856685	6.67827E-08	-0.01092352	212.952729129

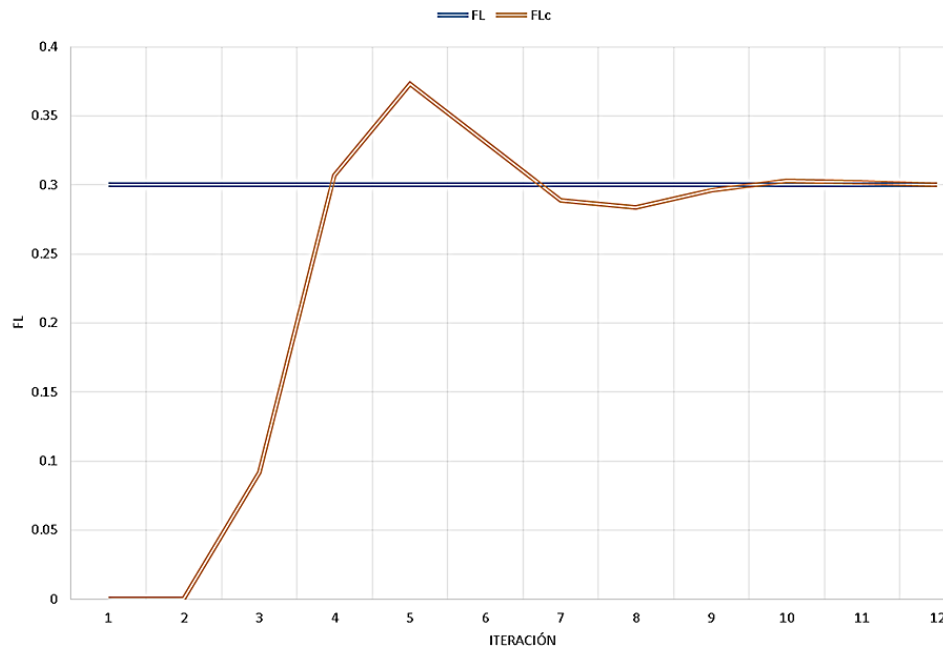


Figura 7 Controlador aplicado con una FL menor a FL_C .

Finalmente, para el tercer experimento, se mantuvieron los valores de entrada iniciales y se estableció FL inicial en 0.7 (Exceso de volumen de drenaje) además de proponer el intervalo inicial de riego i de 150 minutos (por debajo del intervalo de riego óptimo esperado). En la tabla 3 se muestra la base de datos generada y en la figura 8 se presenta la gráfica obtenida por la acción de control.

El valor del intervalo de riego óptimo I según lo apreciado en la base de datos generada alcanzó el valor de 212 minutos.

4. Conclusiones

El controlador presentado muestra una buena respuesta manteniendo siempre una FL_C indicada por el usuario, en la experimentación se analizaron tres casos comunes en el método de bandeja de demanda; un caso en el que la FL es alta (un volumen de drenaje superior al necesario), un caso en que FL es nulo (un volumen de drenaje inexistente) y un caso en el que la aproximación inicial al intervalo de riego es menor al esperado, en estos tres casos la acción del controlador PID entregó un valor óptimo de riego similar, por lo que se comprueba el correcto funcionamiento de esta técnica de riego.

Tabla 3 Base de datos generada con un i de 150 minutos.

Tiempo	FLc	FL (Drenaje)	Error	Proporcional	Integral	Derivativo	Incremento	Intervalo
150	0.3	0.7	0.4	24	40	0.003738318	64.00373832	150
214	0.3	0.2964	-0.0036	-0.216	39.64	-0.00318513	39.42081487	214
253.427738	0.3	0.16234569	-0.13765431	-8.25925862	-14.125431	-0.00116044	-22.3858501	253.427738317
231.039864	0.3	0.238464464	-0.06153554	-3.69213216	-19.9189846	0.000733931	-23.6103829	231.039863544
207.427586	0.3	0.318746207	0.018746207	1.124772394	-4.27893295	0.00078602	-3.15337454	207.427586304
204.27416	0.3	0.329467857	0.029467857	1.768071425	4.821406365	0.000101692	6.589579482	204.274159681
210.864423	0.3	0.30706096	0.00706096	0.423657608	3.652881722	-0.00020849	4.076330836	210.864423490
214.941065	0.3	0.293200381	-0.00679962	-0.40797716	0.026134079	-0.0001292	-0.38197228	214.941064512
214.559013	0.3	0.294499356	-0.00550064	-0.33003864	-1.23002633	1.2197E-05	-1.56005278	214.559012937
212.998819	0.3	0.299804016	-0.00019598	-0.01175903	-0.56966278	4.99456E-05	-0.58137186	212.998818764
212.941176	0.3	0.3	-5.5511E-17	-3.3307E-15	-1.1102E-14	0	-1.4433E-14	212.941176470
212.941176	0.3	0.3	-5.5511E-17	-3.3307E-15	-1.1102E-14	0	-1.4433E-14	212.941176470
212.941176	0.3	0.3	-5.5511E-17	-3.3307E-15	-1.1102E-14	0	-1.4433E-14	212.941176470
212.941176	0.3	0.3	-5.5511E-17	-3.3307E-15	-1.1102E-14	0	-1.4433E-14	212.941176470
212.941176	0.3	0.3	-5.5511E-17	-3.3307E-15	-1.1102E-14	0	-1.4433E-14	212.941176470
212.941176	0.3	0.3	-5.5511E-17	-3.3307E-15	-1.1102E-14	0	-1.4433E-14	212.941176470
212.941176	0.3	0.3	-5.5511E-17	-3.3307E-15	-1.1102E-14	0	-1.4433E-14	212.941176470
212.941176	0.3	0.3	-5.5511E-17	-3.3307E-15	-1.1102E-14	0	-1.4433E-14	212.941176470

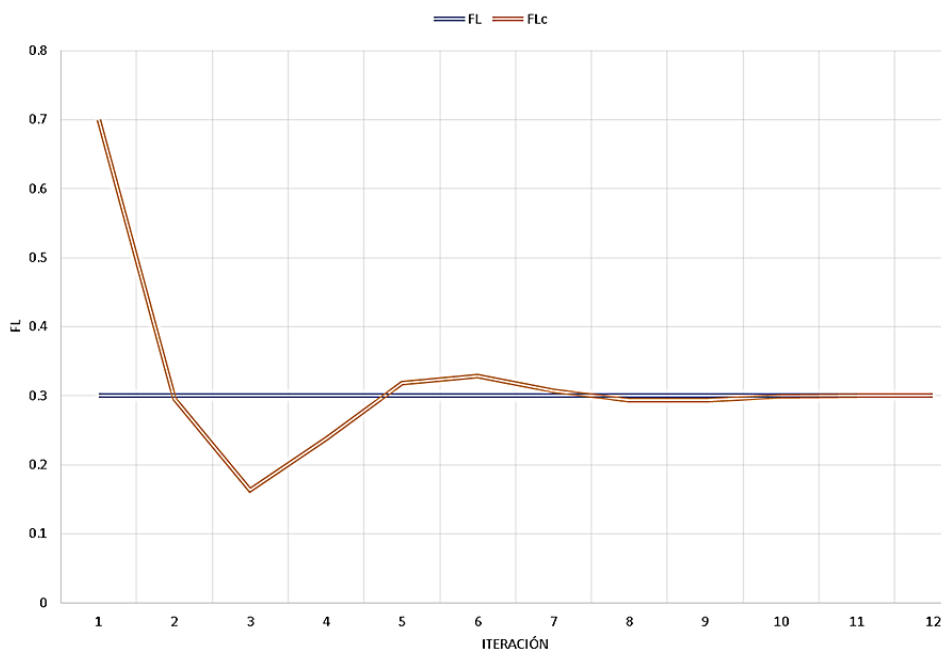


Figura 8 Acción del controlador PID.

A diferencia de otras metodologías mencionadas, que se basan en el cálculo de un balance hídrico mediante el modelado de la transpiración del cultivo de los datos climáticos obtenidos en el invernadero y otras técnicas que analizan el estado de humedad o el potencial hídrico del sustrato, el sistema propuesto permite aplicar el riego a partir de las necesidades hídricas reales del cultivo (Volumen de drenaje). Se reduce el número de cálculos necesarios, el costo y la complejidad para aplicar esta metodología, lo cual hace que la propuesta sea una opción válida para implementación.

El hecho de utilizar una base de datos para lectura/escritura de una y el uso de una interfaz como LabVIEW, aumenta el panorama del proyecto permitiendo utilizar un sistema modular para aumentar las variables medidas en un cultivo, aprovechando además el uso de tecnologías de la comunicación para proponer como trabajo a futuro un monitoreo remoto en dispositivos móviles.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Alba González, R. Rodríguez Mercado, D. 2014. Aplicación de bases de datos en Labview para control de riego en invernaderos mediante el método de bandeja de demanda. *Pistas Educativas Año XXXV* - ISSN 1405-1249: 977-997.
- [2] Cáceres, R., Casadesús, J. & Marfa, O. 2007 Adaptation of an Automatic Irrigation-control Tray System for Outdoor Nurseries. *Biosystems Engineering* 96(3): 419–425.
- [3] Davis, S. L., & Dukes, M. D. (2012). Landscape irrigation with evapotranspiration controllers in a humid climate. *Trans. ASABE*, 55(2), 571-580.
- [4] Dukes, M. D., & Scholberg, J. M. (2005). Soil moisture controlled subsurface drip irrigation on sandy soils. *Appl. Eng. Agric.*, 21(1), 89-101.
- [5] Gallardo, M., Thompson, R. B., Rodríguez, J. S., Rodríguez, F., Fernández, M. D., Sánchez, J. A., & Magán, J. J. 2009. Simulation of transpiration, drainage, N uptake, nitrate leaching, and N uptake concentration in tomato grown in open substrate. *Agric. Water Manag.*, 96(12), 1773-1784.

- [6] Evans, R. G., Iversen, W. M., & Kim, Y. (2011). Integrated decision support, sensor networks, and adaptive control for wireless site-specific sprinkler irrigation. *Appl. Eng. Agric.*, 28(3), 377-387.
- [7] Gómez, J. Rodríguez, D. & Carmona, J. 2018. Sistema de instrumentación digital con aplicación en el monitoreo del riego de cultivos hidropónicos basados en el método de bandeja de demanda. ISSN 1946-5351. Vol. 10#3.
- [8] Hayward, H.E., y E.M. Long. 1943. Some effects of sodium salts on the growth of the tomato. *Plant Physiol.* 18(4):556–569.
- [9] Hibbs, R. A., James, L. G., & Cavalieri, R. P. (1992). A furrow irrigation automation system utilizing adaptive control. *Trans. ASAE*, 35(3), 1063-1067.
- [10] Jobes, J.A., Hoffman, G.J. and Wood, J.D. 1981. Leaching requirement for salinity control II. Oat, Tomato, and cauliflower. *Agricultural Water Management* 4: 393-407.
- [11] Kranz, W. L., Evans, R. G., Lamm, F. R., O'Shaughnessy, S. A., & Peters, R. T. (2012). A review of mechanical move sprinkler irrigation control and automation technologies. *Appl. Eng. Agric.*, 28(3), 389-397.
- [12] Massa, D., Incrocci, L., Maggini, R., Carmassi, G., Campiotti, C. A., & Pardossi, A. 2010. Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from soilless cultures of greenhouse tomato. *Agric. Water Manag.*, 97(7): 971-980.
- [13] Moataz, S. Tobi, A. Tarek, H. Jiehan, Z. 2013. Smart Home: Integrating Internet of Things with Web Services and Cloud Computing. *IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science*.
- [14] Perez, C., Camacho, E., Roldan, J., Alcaide, M., & Reca, J. (1995). A control system of furrow irrigation in real time. *Phys. Chem. Earth.*, 20(3), 351-358.
- [15] Rodríguez Mercado, D. 2013, Diseño de un sistema de control automático del riego de cultivos hidropónicos mediante una bandeja de demanda. Tesis Doctoral. Universidad de Almería.
- [16] Rodríguez Mercado, D. Reca, J. 2015. Development of New control algorithm for automatic irrigation scheduling in Soilless Culture. *Appl. Math. Inf. Sci.* 9, No. 1: 47-56

- [17] Rodríguez Mercado, D. Reca, J. Martinez, J. Urrestarazu, M. 2017. Automatic Irrigation System for Soilles Culture Based On Feedback From Drainage Hydrograph. American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0883-8542.
- [18] Sonneveld, C. 2000. Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture. PhD diss. The Netherlands: Wageningen Agricultural University.
- [19] Sonneveld, C., & Voogt, W. 2009. Plant nutrition of greenhouse crops. New York, NY: Springer.
- [20] Urrestarazu, M. 2004, Tratado de Cultivos Sin Suelo, Ediciones Mundi-Prensa: 159-523.
- [21] Zazueta, F. S., & Smajstrla, A. G. (1992). Microcomputer-based control of irrigation systems. Appl. Eng. Agric., 8(5), 593-596.